

# Built-in guide 타입 다중 로봇의 고층 빌딩 외벽 청소를 위한 센서 기반 운동 계획 알고리즘

## Sensor-based Motion Planning Algorithm for High-rise Building Façade Cleaning of Built-in Guide Type Multi-Robot

이 승 훈, 김 동 형, 강 민 성, 길 명 수, 김 영 수, 백 성 훈, 한 창 수\*

(Seunghoon Lee<sup>1</sup>, Dong-Hyung Kim<sup>1</sup>, Min-Sung Kang<sup>1</sup>, Myung-Soo Gil<sup>1</sup>, YoungSoo Kim<sup>1</sup>, SungHoon Back<sup>1</sup>, and Chang-Soo Han<sup>1</sup>)

<sup>1</sup>Hanyang University

**Abstract:** With the increasing number of high-rise and large-scale buildings, modern buildings are becoming intelligent, and are incurring high construction costs and requiring careful maintenance. Maintenance works for high-rise buildings significantly depend on human labor, unlike other construction processes that are gradually being automated. The resulting accidents may produce very high social and economic losses. To address this problem, herein, this paper proposes robotic building maintenance system using multi-robot concept, in specific, cleaning a building façade which is directly subjected to minimize human labor; that improves the process efficiency and economic feasibility. The sensor for detecting contamination of building's outer-wall glass is proposed; Kalman filter was used for estimating robots' status with the contamination of the window glass. Task allocation of the sensor based multi-robots for an effective way of task execution is introduced and the feasibility was verified through the simulations.

**Keywords:** multi-robot, robotic building maintenance system, built-in guide rail type robot, motion planning

### I. 서론

현대 건축물은 고층, 대형화 추세에 따라 점차 첨단화 되어가고 있지만, 이에 따른 고가의 건설비용과 더불어 유지보수 및 관리비용의 지출이 불가피하다는 한계점을 갖고 있다. 종래의 고층 건축물의 청소, 도장 및 균열 검사 등과 같은 유지, 관리작업은 주로 로프 및 곤돌라, 윈치 시스템을 이용하는 재래식 빌딩 외벽 유지관리 방법에 의존하고 있고, 점차 자동화되어 가고 있는 타 건설공정에 비하여 인력에 대한 의존도가 매우 높기 때문에 안전사고로 인한 사회, 경제적 손실 역시 매우 큰 특징을 갖고 있다[1-5]. 이처럼 위험한 작업환경에서 수행되는 고층 빌딩의 유지관리 작업에 대한 자동화 필요성이 점차 증대되고 있으며, 상기의 문제점을 해결하고자, 최근 유럽, 일본, 미국 등을 주축으로 한 BMU (Building Maintenance Unit)의 자동화 및 관련 로봇에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 실제로 독일의 Fraunhofer IPA, Manntech, 일본의 Nihon Bisoh 등의 연구소 및 기업에서 선보인 시범운영 단계의 로봇 플랫폼을 들 수 있고, 이미 요코하마 랜드마크 타워, 오사카 크리스탈 타워와 같은 고층 빌딩의 청소작업에 로봇을 적용하여 상용화에 성공한 사례까지 소개되고 있다(그림 1).

이러한 로봇/자동화 시스템은 기존 건축물의 입면 형상 정

보를 활용하여 복잡한 연산 과정 없이 단순한 논리만으로 로봇 경로를 미리 생성하고, 계획할 수 있다는 장점이 있지만, 로봇에 필요한 모든 물자, 예컨대 물, 세제, 배터리 등을 싣고 이동 및 작업을 수행해야 하는 큰 위험성을 수반하기 때문에 로봇/자동화 시스템 1대 만으로 고층 빌딩의 모든 영역과 작업을 할당하기에 부적합하다[6-11]. 결과적으로 시스템의 효율성, 경제성 및 안전성이 결여될 수 있다는 한계를 드러내며, 이는 실제 고층 건물의 외벽 영역을 분할하여 여러 작업자가 동시에 작업을 함에서도 확인할 수 있다.

앞서 언급한 문제점들을 해결하고자, 본 논문은 고층빌딩의 유지관리를 위한 시스템의 위험성 분산과 효율성 향상을 위한 전략으로써 Built-in guide 타입 다중 로봇 개념을 제안하고, 다양한 유지관리 작업 중 외벽 유리면 청소 작업을 위한 운동 계획(motion planning) 알고리즘을 다룬다[12,13]. Built-in guide 타입의 로봇은 정해진 레일 위를 따라 움직일 수 밖에 없지만, 외벽 유리면의 오염도 측정 센서를 사용하여 이에 따른 위치 및 이동 속도를 제어한다. 그러므로 오염도가 높은 곳에 대한 집중 청소를 위해 천천히 이동시키고, 반대로 오염도가 낮은 곳에서 빠르게 이동시킨다. 또한 이러한 청소 로봇들을 효과적으로 각 층에 분배함으로써 보다 빠른 청소 시간을 보장한다. 이렇게 제안된 방법은 고층 건물에 청소 로봇이 작업을 수행하는 시뮬레이션을 수행함으로써 그 성능 및 타당성이 검증되었다.

### II. 외벽 유지관리를 위한 다중로봇 시스템

#### 1. 시스템 구성 및 작업 운용

이미 소개된 바 있는 고층빌딩 및 일반 건축물의 외벽 유지관리를 위한 로봇 시스템들은 개념 제시 단계의 로봇 프로토타입과 상용화에 성공한 바 있는 자동화 시스템 2가지 형

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 2. 26., 수정: 2012. 3. 20., 채택확정: 2012. 3. 27.

이승훈, 김동형, 한창수: 한양대학교 기계공학과

(hopezic@gmail.com/fileman@hanyang.ac.kr/cshan@hanyang.ac.kr)

강민성, 길명수, 김영수, 백성훈: 한양대학교 메카트로닉스 공학과

(wowmecha@gmail.com/well798@paran.com/gwa6@mest.go.kr/airback@hyundai-rotem.co.kr)

※ 본 연구는 국토해양부 2011년도 건설기술혁신사업(과제번호:10 기술혁신E03) 및 지식경제부 기술혁신사업지원 (과제번호:10040180)의 연구결과로 수행 되었음.

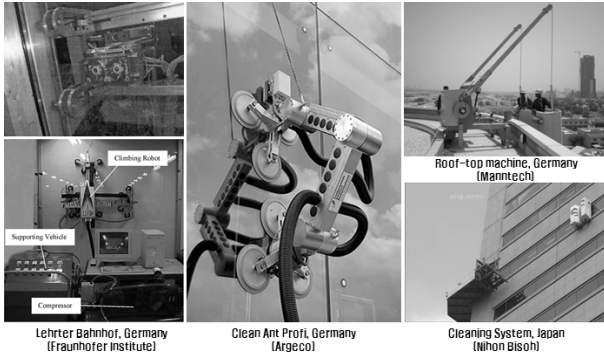


그림 1. 외벽유지관리 시스템 관련 해외연구개발 사례.

Fig. 1. State of the art in building façade maintenance system.

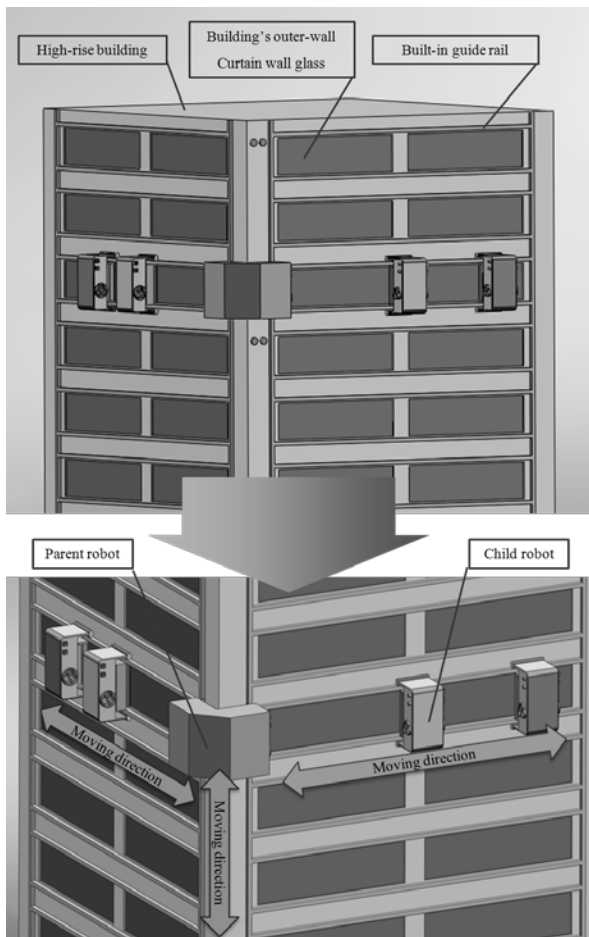


그림 2. 시스템 구성 및 운용 시나리오.

Fig. 2. System configuration and its task scenario.

태로 분류가 될 수 있다. 첫 번째 프로토타입의 경우에는 대부분 흡착 방식의 빌딩 외벽을 이동하는 메커니즘에 관한 연구가 주를 이루었고, 이는 시스템의 안정성 측면에 있어 한계가 있어 이를 실제 고층 빌딩의 외벽환경에 적용하기에는 아직 무리가 있다. 두 번째로, 이미 상용화된 로봇/자동화 시스템의 경우에는 곤돌라, 원치 혹은 레일을 이용한 형태와 둘의 장점을 살린 혼합 형태로 분류 되어지며, 주로 건물전체 영역에 대한 외벽청소 작업을 수행하고 있다.

본 연구에서는 매우 위험한 환경에서 운용되고 있는 외벽

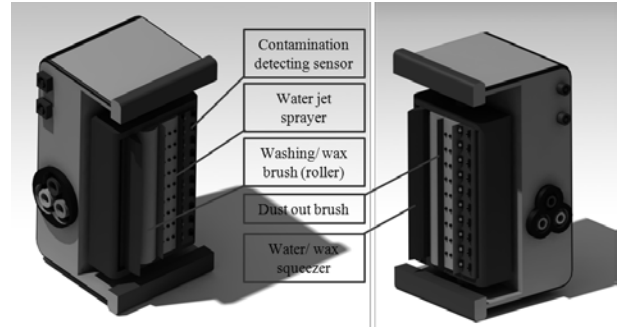


그림 3. 다중로봇의 외벽 청소용구 구성.

Fig. 3. Configuration of tool for building façade.

유지관리 로봇의 안정성 향상을 위하여 건축물에 既 설치된 rail (이하, BGR: Built-in Guide Rail) 위에서 운용되는 다중로봇의 개념을 제안하고, 다양한 빌딩 외벽면 유지관리 작업 중 커튼월(Curtain-wall) 유리벽면에서 가장 빈번히 수행 되어지는 청소작업을 선정하여 이를 분담하고, 결과적으로 위험성을 분산시킬 수 있는 방법에 대하여 다룰 것이다[14-18].

다중로봇 시스템은 parent-robot과 child-robot으로 구분되어 지고, 1개의 parent-robot은  $n$ 개의 child-robot을 싣고 이동 장소까지 운반한다고 가정한다(그림 2). 각각은 수직과 수평 방향으로만 운동이 가능하며, 실제 고층 빌딩의 외벽 유지관리 작업은  $n$ 개의 child-robot이 수행하는데, 이들 로봇에는 모듈 형태의 외벽 유지관리 툴이 있다(그림 3).

청소 공정의 경우 “분무(spraying), 문지르기(brushing), 닦아내기(squeezing)”의 3단계를 거치며, 본 연구에서는 고층 빌딩의 외벽 유리면의 분진에 의한 오염도를 판단하고 이에 따른 로봇의 모션을 제어하여, 효율적으로 공정을 운용하는 것을 목표로 한다. 따라서, 이전 연구에서 제안하였던 IR 센서 기반 오염도 측정용 센서 모듈을 child-robot에 탑재하여 청소 공정을 위한 작업용 툴 모듈을 다음과 같이 구성하였으나, 본 연구에서 다중로봇의 적용 타당성 검증을 위한 시뮬레이션에서는 상기한 청소 공정을 생각하고, child-robot의 빌딩 외벽 BGR을 이동하는 때에 모든 공정이 이루어진다고 가정한다[19,20]. 그러므로, child-robot 각각의 이동 및 작업 성능은 동일하며, 청소 후의 작업 품질은 균일하다고 가정한다. 청소 작업용 툴의 경우에는 물을 필요로 하는 습식과 그렇지 않은 건식과 같이 공정 구분에 의하여 바뀔 수도 있고, 혹은 다중로봇의 개수 및 담당 역할 등에 따라서도 다양하게 구분될 수 있다. 하지만 본 연구에서는 청소용제 및 물을 사용하는 습식형태의 청소 방법을 고려함으로써, 분무 및 닦아내기 작업은 건물 위쪽에서부터 순차, 독립적으로 이루어진다고 가정한다.

## 2. 오염도 측정 시스템

고층 빌딩 외벽 유리면의 경우 분진과 고층부의 극심한 기온 및 기압차 등에 의한 수분, 강우 등으로 인하여 유리면의 탁도가 변화하게 되며, 실제로 고층 빌딩의 외벽 유리면은 오염으로 인한 채광량 및 가시성 변화가 일반적으로 나타난다. 따라서 이러한 고층 빌딩 외벽 유리면의 오염도를 측정하기 위한 센서의 구성은 빌딩 외부환경에서 태양광 반사와 같은 가시광 영역의 영향을 받지 않는 IR 센서의 병렬 조합



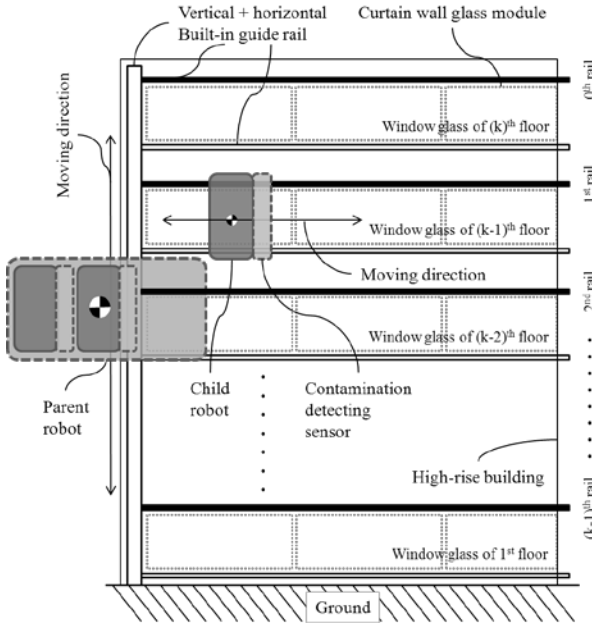


그림 6. 다중로봇을 이용한 고층빌딩 청소 개념도.

Fig. 6. Schematic of system configuration using multi-robots for building façade cleaning.

robot을 청소를 수행해야 할 수평 레일에 위치시키는 것이다. 1대의 child-robot이 한 개 층의 BGR을 이동 중인 때에는 다른 child-robot이 그 BGR 위에 위치할 수 없다. 즉, 동일한 층 혹은 다른 층을 이동 중인 child-robot 간의 충돌은 없다.

앞서 언급한, 자체 제작한 오염도 측정 센서 모듈로 측정된 오염 정도를 0~100 %로 정량적으로 나타내고, 그림 6과 같이 오염도 센서는 child-robot이 수평 레일을 움직이는 동안 로봇으로부터  $r_{max}$  만큼 떨어진 곳의 오염도를 측정한다. 여기서 child-robot이 측정한 오염도를  $c$ 로 정의하며,  $0 \leq c \leq 1$ 이다. Child-robot의 동역학적인 요소는 고려하지 않으며, 기구학적 모델을 사용한다. 로봇은 수평 레일 위를 직선 운동을 하므로 그림과 같이 수평 레일이 시작되는 지점에  $X$ 축이 수평 레일과 평행한 좌표계를 사용한다(그림 7). 여기서  $Y$ 축에서 떨어진 거리  $x$ 가 child-robot의 위치이다. 그리고 관심 변수는 child-robot의 위치  $x$ , 속도  $\dot{x}$  그리고 센서로부터 측정된 오염도  $c$  이므로,  $k$  번째 불연속 단계에서 child-robot 모델의 상태 변수를  $\mathbf{X}_k = [x_k \ \dot{x}_k \ c_k]^T$ 로 정의한다. 여기서 child-robot의 위치 및 오염도는 측정 가능하며, 센서의 불확실성을 고려하기 위하여 아래와 같이 시스템 및 측정 노이즈를 포함하는 child-robot의 모델을 고려한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{k+1} &= \mathbf{F}\mathbf{X}_k + \mathbf{G}u_k + \mathbf{w}_k, \\ \mathbf{z}_k &= \mathbf{H}\mathbf{X}_k + \mathbf{w}_k. \end{aligned} \quad (1)$$

여기서

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} T \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

이고,  $\mathbf{F}$ ,  $\mathbf{G}$ ,  $\mathbf{F}$ ,  $\mathbf{H}$ 는 시스템 행렬 혹은 벡터이다. 그리고  $T$ 는

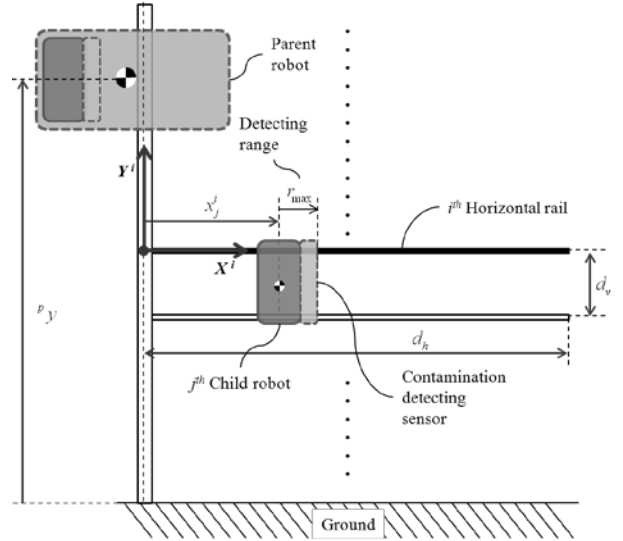


그림 7. 수직/ 수평 BGR을 움직이는 청소로봇 모델 및 좌표.  
Fig. 7. Coordinates of the cleaning robots following the BGR.

sample time,  $u_k$ 는 속도 입력이다. 또한  $\mathbf{n}_k$ 와  $\mathbf{w}_k$ 는 각각 시스템 및 측정 노이즈 벡터이며 아래와 같이 정의된다.

$$\mathbf{n}_k = \begin{bmatrix} n_{r,k} \\ n_{c,k} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{w}_k = \begin{bmatrix} w_{p,k} \\ w_{c,k} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서  $n_{r,k}$ 와  $n_{c,k}$ 는 각각 child-robot 및 오염도 센서 시스템의 노이즈이며, 그리고  $w_{p,k}$ 와  $w_{c,k}$ 는 위치 센서 및 오염도 측정 센서 노이즈이다. 이러한 노이즈들은 Gaussian 분포를 지닌 백색 잡음 (white noise)이며, 각각의 분산은  $Q$ ,  $Q_c$ ,  $R_p$ ,  $R_c$ 이다.

## 2. Kalman Filter 기반 child-robot의 위치 및 오염도 추정

Child-robot의 모델에서 알 수 있듯이, 본 논문은 실제 시스템에서 발생할 수 있는 불확실성을 고려한다. 이러한 불확실성으로 인한 오차를 최소화 하고자 Kalman Filter를 적용하여 정확한 로봇 위치 및 오염도를 추정한다[25]. Kalman filter는 크게 (1) Prediction 와 (2) Measurement update 두 단계를 반복한다. Prediction 단계에서, 알려진 모델 변수와 child-robot에 가해진 속도 입력  $u_k$ 을 사용하여 아래 식으로 prediction을 수행한다.

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{X}}_{k+1} &= \mathbf{F}\hat{\mathbf{X}}_k + \mathbf{G}u_k, \\ \bar{\mathbf{P}}_{k+1} &= \mathbf{F}\mathbf{P}_k\mathbf{F}^T + \mathbf{Q}. \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $\bar{\mathbf{X}}$ 와  $\hat{\mathbf{X}}$ 는 각각 state의 prediction과 estimation이다. 그리고  $\mathbf{P}$ 는 error covariance 행렬로써, 위 식으로부터 다음 단계의 error covariance 행렬이 예측됨을 알 수 있다.

Measurement update 단계에서는 센서로부터 측정된 로봇의 위치와 오염도를 가지고 Kalman gain  $\mathbf{K}$ 를 계산한 뒤 상태 변수를 추정한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_k &= \bar{\mathbf{P}}_k \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \bar{\mathbf{P}}_k \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}, \\ \hat{\mathbf{X}}_k &= \bar{\mathbf{X}}_k + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{H} \bar{\mathbf{X}}_k). \end{aligned} \quad (4)$$

그리고 error covariance 행렬을 아래 식을 사용하여 업데이트

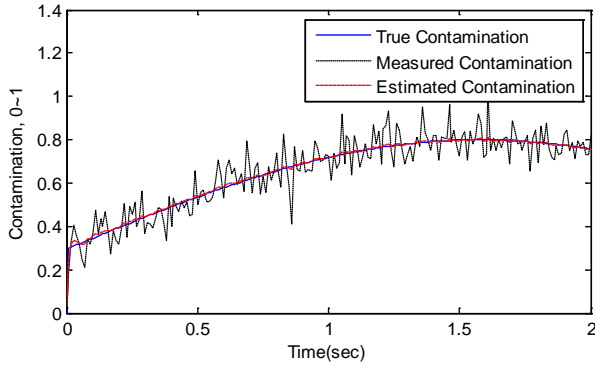


그림 8. 칼만 필터를 통한 오염도 추정 예시.

Fig. 8. Example of the estimation of contamination.

시켜준다.

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \bar{\mathbf{P}}_k. \quad (5)$$

따라서 식 (3)과 식 (4), 식 (5)를 반복적으로 사용함으로써 노이즈의 영향을 최소화시키는 child-robot의 상태변수, 즉 child-robot의 위치와 로봇 전방에서 오염도를 추정한다. 이러한 방법을 검증하고자 오염도 측정 시뮬레이션을 수행했다. 시간에 따라 주기 함수와 같은 형태의 오염도가 주어진다 가정하며, 여기서 센서로 계속되는 오염도의 분산은 0.07이다. 칼만 필터를 적용하여 그림 8과 같이 노이즈가 포함된 계속 신호에서 참 값에 유사한 오염도를 추정할 수 있음을 알 수 있다.

#### IV. 오염도 센서 기반 청소 운동 계획

Parent-robot은 다수의 child-robot을 지닌 채로 수직 레일을 이동하며 child-robot을 수평 레일에 놓아주거나, 청소를 마친 child-robot을 다른 층으로 이송한다. 여기서 child-robot의 이동 속도는 오염도 센서로부터 측정된 오염도에 의해 선형적으로 변화된다. 즉, 오염도가 높은 곳은 더욱 집중적인 청소를 수행해야 하므로 속도를 줄이는 반면, 상대적으로 오염도가 낮은 곳은 빠르게 지나가 다른 오염지역의 청소를 하기 위해 속도를 증가시킨다. 로봇이 이렇듯 오염 정도에 기반하여 청소를 수행 함으로써 보다 효율적인 외벽 청소가 가능하다. 오염도에 따른 child-robot의 이동 속도 변화는 child-robot 한 대가 하나의 수평 레일을 청소하는데 소요되는 시간이 변할 수 있음을 의미한다. 따라서 청소 운동 계획의 목표는 전체 청소 시간을 최소화 시킬 수 있도록 parent-robot이 child-robot들을 운영하는 것이다.

##### 1. Child 로봇의 오염도 센서 기반 청소 운동 계획

Parent-robot과 child-robot의 위치를 나타내기 위한 좌표계는 그림 7과 같다. 수평 레일의 개수는  $k$  이고, child-robot의 개수는  $n$  이다. Parent-robot이 수직 레일 위를 움직인 거리는  $y_j$  이고,  $j$  번째 child-robot이  $i$  번째 수평 레일을 따라 수직 레일로부터 멀어지는 거리가  $x_j^i$  이다. 여기서  $i = 0, 1, \dots, k-1$  이고  $j = 0, 1, \dots, n-1$  이다. 그리고 수평 레일의 길이는  $d_h$  이고, 수평 레일 간의 수직 방향 간격은  $d_v$  이다.

Parent-robot의 최대 속도 크기를  $v_{p,max}$  로 정의하며, 청소 중에는 항상 이 속도로 이동하도록 한다. 그리고 child-robot

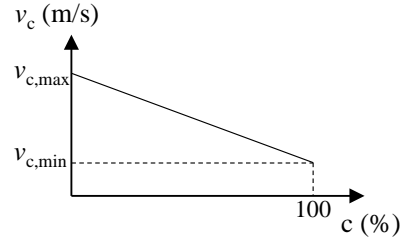


그림 9. 오염도에 따른 child-robot의 이동 속도.

Fig. 9. Velocity profile of the child-robot with respect to the contamination of building.

의 최대 및 최소 속도 크기는 각각  $v_{c,max}$ ,  $v_{c,min}$  로 정의한다. 오염도가 없는 곳에서 최대값  $v_{c,max}$  이고, 오염도가 최대인 곳에서 최소값  $v_{c,min}$  이다. 두 속도 간에 오염도에 따른 child-robot의 속도는 그림 9와 같이 선형 관계를 갖는다. 단 이러한 속도 변화는 양의 방향으로 수평 레일을 움직일 때, 즉 초기 청소를 할 경우에만 적용되며, 청소 후 음의 방향으로 다시 돌아올 때에는 최대 속도  $v_{c,max}$  로 돌아온다. 여기서 child-robot이 오염도에 변화하는 속도로 이동할 경우, 해당 위치에서 오염 물질을 제거하기 위한 청소 작업은 충분히 수행 된다고 가정한다.

오염도는 각 수평 레일의 거리에 따라 존재하는 값이므로  $c_j^i(x_j^i)$  와 같이 나타낼 수 있다.  $i$  번째 수평 레일에서 거리에 따른 오염도의 적분 값을 아래와 같이  $s_i$  로 표현한다.

$$s_i = \int_0^{d_h} c_j^i(x_j^i) dx_j^i \quad (6)$$

여기서  $0 \leq c_j^i \leq 1$  이므로  $0 \leq s_i \leq d_h$  가 성립한다.

식 (6)으로부터 오염도에 따른 child-robot 한 대가 청소를 수행하는데 소모되는 청소 시간의 범위를 고려한다. 식 (6)이 최소값을 갖는 경우,  $s_i = 0$  이고 오염도가 측정되지 않아 child-robot이 항상 최고 속도로 이동한다. child-robot이 청소를 마치고 원 위치로 복귀하는데 걸리는 시간은 총  $2d_h/v_{c,max}$  이다. 반면 식 (6)이 최대값을 갖는 경우,  $s_i = d_h$  이고 이는 수평 레일 모든 영역의 오염도가 최대치인 1 이다. 이때  $d_h/v_{c,min} + d_h/v_{c,max}$  만큼의 시간이 소모된다. 따라서  $i$  번째 수평 레일에서 child-robot이 청소를 마치고 복귀하는데 걸리는 시간  $t_{i,child}$ 의 범위는 아래와 같이 표현된다.

$$\frac{2d_h}{v_{c,max}} \leq t_{i,child} \leq \frac{d_h}{v_{c,min}} + \frac{d_h}{v_{c,max}} \quad (7)$$

##### 2. 청소 운동 계획 알고리즘

수평 레일의 번호는 위에서부터 아래로 부여되며, 청소 작업은 최 상위 층, 즉 첫 번째 수평 레일부터 수행한다. 여기서 parent-robot은  $n$  개의 child-robot을 한꺼번에 이송시킬 수 있다고 가정한다. 또한 수평 레일 위에는 장애물이 없다고 가정한다(그림 7). 그리고 청소 로봇의 청소 운동 계획 시에  $n$ 개의 child-robot 위치 및 로봇 전방의 오염도는 앞서 III 장에서 언급한 Kalman filter로 추정된 결과를 사용한다.

Built-in guide 타입 다중 청소 로봇이 청소를 수행하기 위한 대략적인 알고리즘의 구조는 그림 10과 같다. Parent-robot은 수직 레일을 따라 이동하며, 초기 청소 시작 시에 최상층 레

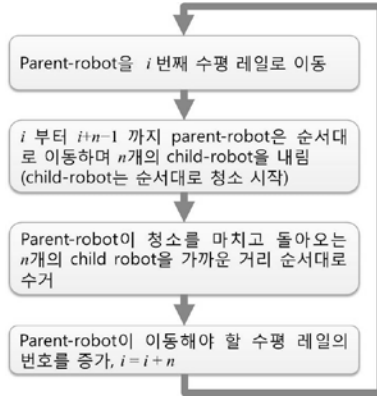


그림 10. 다중 청소 로봇의 청소 알고리즘 구조.

Fig. 10. Structure of the cleaning algorithm for the multi-cleaning robots.

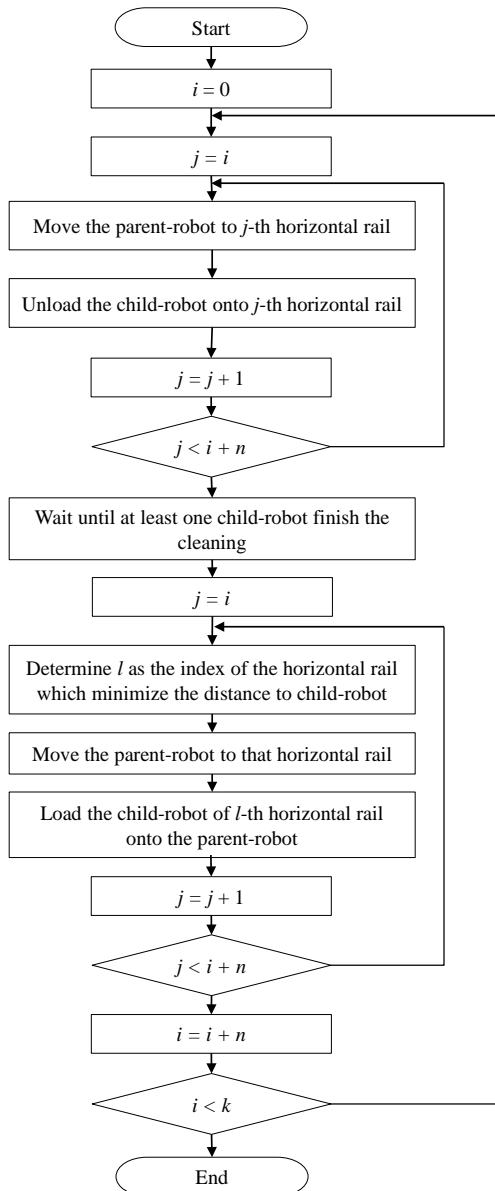


그림 11. 다중 청소 로봇의 청소 알고리즘 순서도.

Fig. 11. Structure of the cleaning algorithm for the multi-cleaning robots.

일, 즉  $i = 0$  번째 레일부터 청소를 시작한다. 그리고 각각의 child-robot이 수평 레일 위를 이동하며 청소를 수행해야 하므로, parent-robot은  $i = 0$  부터  $i = k - 1$  번째 레일까지 순서대로 child-robot을 내려준다. 따라서 child-robot은 이 순서대로 수평 레일을 따라 청소를 시작한다. 하지만 그림 9와 같이 오염도에 의해 child-robot의 속도가 변화하므로 parent-robot이 child-robot을 수평레일에 내려놓는 순서대로 청소가 끝나지 않을 수도 있다. 따라서 parent-robot이 child-robot을 수거할 때에는 청소를 마치고 돌아오는 것들 중 가장 가까운 거리 순서대로 수거한다. 이러한 알고리즘에 대한 상세 내용은 그림 11의 흐름도로 표현되어 있다.

### 3. 운동 계획을 통한 전체 청소 시간

앞서 식 (7)로부터 child-robot 한 대가 청소를 수행하는데 소요되는 시간의 범위를 나타내었다. 이 식을 사용하여 제안된 알고리즘을 통한 전체 청소 시간을 고려한다.

Parent robot이 첫 번째 레일까지 이동하는데 소요되는 시간은 아래와 같다.

$$(k-1) \frac{d_v}{v_{p,\max}} \quad (8)$$

그리고 위 식 (8)과 parent-robot이 수직레일을 움직이는데 소요되는 시간을 고려할 경우 전체 청소 시간의 범위는 아래와 같이 표현된다.

$$\frac{k \left( \frac{2d_h}{v_{c,\max}} \right) + \frac{\{n + (k-1)\}h}{v_{p,\max}}}{n} \leq t_{\text{total}} \leq \frac{k \left( \frac{d_h}{v_{c,\min}} + \frac{d_h}{v_{c,\max}} \right) + \frac{\{2n + (k-1)\}h}{v_{p,\max}}}{n} \quad (9)$$

## V. 시뮬레이션 결과

본 논문이 제안하는 청소 운동 계획 알고리즘의 성능을 검증해보기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 수행하기 위해 사용된 변수들은 다음과 같다(표 3). 고층 빌딩의 층간 거리는 3 m 이며 총 21 개의 수평 레일이 설치되어 있는 건물 환경을 가정한다. 그리고 수평 레일의 길이는 11 m로 가정한다. 그리고 parent-robot의 수직 방향 속도는 0.2 m/s이고, child-robot의 최저 및 최대 속도는 각각 0.01 m/s, 0.05 m/s이다. 다중 로봇을 통한 외벽 청소 성능을 확인하기 위하여 child-robot의 개수가 1개인 경우와 3개인 경우를 시뮬레이션 하였다. 또한 이 두 가지 경우에 대하여 아래의 두 가지 시나리오를 각각 수행하였다.

표 3. 시뮬레이션에 사용된 파라미터.

Table 3. The parameters for simulations.

Symbol	Value	Description
$k$	21	Number of horizontal rails
$n$	3	Number of child-robot
$d_h$	11m	Length of horizontal rail
$d_v$	3m	Distance between the two horizontal rails
$v_{p,\max}$	0.2m/s	Maximum velocity of parent-robot
$v_{c,\min}$	0.01m/s	Minimum velocity of child-robot
$v_{c,\max}$	0.05m/s	Maximum velocity of child-robot

표 4. 각 시나리오에 따른 전체 청소 시간.

Table 4. Total cleaning time for each scenario.

Cleaning method \ Number of child-robot	Single child-robot (n=1)	Multi child-robot (n=3)
Without the sensor (remain the minimum velocity of child-robot)	46500 second or 12.9167 hour	15700 second or 4.4167 hour
Proposed method	17153.4 second or 4.7648 hour	4352.6 second or 1.2091 hour

- Child-robot은 오염도 센서를 사용하지 않고, 청소시 항상 최저 속도  $v_{\min}$  로 이동.
- Child-robot은 청소 중 오염도에 따른 속도를 변화시키며 이동.

이 두 가지 시뮬레이션에 대해서 오염도는 각 층마다 균일하게 분포되는 것으로 가정하며, 분포된 오염도는 0에서 0.7사이의 랜덤한 값을 갖는다. 앞의 첫 번째 시나리오에서는 child-robot이 수평 레일 상의 오염물질이 얼마나 있는지 모르므로 항상 집중 청소를 수행하고, 두 번째 시나리오는 본 연구에서 제안된 방법으로써 오염도에 의해 필요한 이동 속도, 즉 청소 정도를 조절하는 것이다. 총 네 가지 경우에 대하여 시뮬레이션을 각각 수행하였으며, 그 결과인 최종 청소 시간은 표 4에 나타나 있다. 하나의 child-robot을 가지고 센서를 사용하지 않은 경우 청소를 수행하는데 반 나절이 걸린 반면, 3대의 child-robot이 오염도 센서를 사용한 경우 1시간 30분이 안 걸린다.

본 시뮬레이션의 결과는 모든 청소 공정 후의 품질과 청소 성능이 균일하기 때문에 작업 수행 시간을 단축시킬 경우 최대의 작업 효과를 나타낼 수 있다는 대전제 하의 제한된 환경 내에서 수행된 시뮬레이션이었다. 따라서 실제 고층 빌딩 외부 환경에서의 유리 벽면 청소 시에 발생할 수 있는 풍압, 풍하중, 등과 같은 다양한 변수들을 고려하지는 못하였다.

시뮬레이션 결과를 비교해 보면 “1) 센서 기반 다중로봇, 2) 센서 없는 다중로봇, 3) 센서기반 단일로봇, 4) 센서 없는 단일로봇”의 순서로 청소 시간의 단축을 확인할 수 있었고, 다중로봇이 단일로봇의 사용보다는 청소시간을 단축시킬 수 있었고, 센서기반의 시스템이 센서 없이 운용되는 시스템에 비하여 그 효용성이 뛰어남을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제안된 센서기반의 로봇모션 생성 알고리즘과 다중로봇의 개념을 이용한 빌딩 외벽 청소 방법의 제안이 타당하다는 결과를 유추할 수 있었다.

## VI. 결론

본 연구에서는 다중로봇을 이용한 고층 빌딩 외벽 유지관리 작업에 대한 개념을 제안하였고, 특히 유지관리 작업 중, 고층 빌딩의 유리 외벽면에 대한 청소 공정을 연구목표로 센서기반의 시스템을 구성하여 이에 대한 운영 방법론을 소개하였다. 유리 외벽면에 대한 오염도 측정용 센서를 개발하였고, ANOVA를 통한 신뢰성 및 유의성을 검증하였으며, 이를 시스템에 적용한 로봇 모션 생성 알고리즘을 개발하였다. 또한, 다중로봇과 센서 기반의 모션생성 알고리즘에 대한 시뮬레이션을 통하여 본 연구의 타당성을 검증하였는데 실제 다

양한 고층 빌딩의 외부 환경과 청소 공정에 대한 다양한 환경 및 작업 변수들을 고려하지 못하였으므로, 추후 실험에서는 현장 적용 및 검증을 수행하고, 청소 시간 이외의 작업 효율 및 작업 성능을 평가할 수 있는 결과 항목, 이를테면, 공정 시 사용 전력량, 용재량 등에 대한 추가적인 고려와 실증이 이루어질 계획이다.

## 참고문헌

- [1] A. Spedding, *Building maintenance economics and management*, E. & F. N. Spon, Ltd, London, 1987.
- [2] R. M. W. Horner, M. A. El-Haram, and A. K. Munns, “Building maintenance strategy: a new management approach,” *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 3, no. 4, pp. 273-280, 1997.
- [3] A. H. Christer, “Modeling inspection policies for building maintenance,” *The Journal of the Operational Research Society*, vol. 33, no. 8, pp. 723-732, 1982.
- [4] A. Hunt, “Wind-tunnel measurements of surface pressures on cubic building models at several scales,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 10, no. 2, pp. 137-163, 1982.
- [5] D. W. Boggs, N. Hosoya, and L. Cochran, “Sources of torsional wind loading on tall buildings: Lessons from the wind tunnel,” *Advanced Technology in Structural Engineering, Proceedings of the 2000 Structures Congress & Exposition*, Philadelphia, 2000.
- [6] M. Armada, S. Gonzalez, M. A. Jimenez, and M. Prieto, “Application of CLAWAR Machines,” *International Journal of Robotics Research*, vol. 22, no. 3, pp. 251-264, 2003.
- [7] C. Hillenbrand, D. Schmidt, and K. Berns, “CROMSCI: development of a climbing robot with negative pressure adhesion for inspections,” *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 35, no. 3, pp. 228-237, 2008.
- [8] N. Elkmann, D. Kunst, T. Krueger, M. Lucke, T. Bohme, T. Felsch, and T. Sturze, “SIRIUS: facade cleaning robot for a high-rise building in munich, germany,” *Proc. of the 7th International Conference Climbing and Walking Robots, Part IX*, pp. 1033-1040, 2005.
- [9] A. Kochan, “CLAWAR highlights research progress on climbing and walking robots,” *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 32, no. 2, pp. 112-119, 2005.
- [10] B. Chu, K. Jung, C. Han, and D. Hong, “A survey of climbing robots: locomotion and adhesion,” *International journal of precision engineering and manufacturing*, vol. 11, no. 4, pp. 633-647, 2010.
- [11] H. Zhang, J. Zhang, G. Zong, W. Wang, and R. Liu, “Sky Cleaner 3: a real pneumatic climbing robot for glass-wall cleaning,” *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 13, no. 1, pp. 32-41, 2006.
- [12] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, and R. L. Rivest, *Introduction to algorithms*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1997.
- [13] P. Brucker, *Scheduling Algorithms*, 2nd Ed., Springer-Verlag, Berlin, 1998.
- [14] T. Yasuda and K. Ohkura, *Multi-Robot Systems, Trends and Development*, Yasuda T., Ohkura K. Eds., InTech, 2011.
- [15] B. P. Gerkey and M. J. Mataric, “Multi-robot task allocation: Analyzing the complexity and optimality of key architectures,” *In Proceedings of the IEEE International Conference on*



*Robotics and Automation*, pp. 3862-3868, 2003.

- [16] B. P. Gerkey and M. J. Mataric, "A formal analysis and taxonomy of task allocation in multi-robot systems," *International Journal of Robotics Research*, vol. 23, no. 9, pp. 939-954, 2004.
- [17] T. Yang, W. Choi, and J. Lee, "Localization of multiple robots in a wide area," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 3, pp. 293-299, 2010.
- [18] Y. H. Choi and S. J. Yoo, "Adaptive formation control of non-holonomic multiple mobile robots considering unknown slippage," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 1, pp. 5-11, 2010.
- [19] S. Lee, M. Kang, J. Wu, K. Shin, A. E. Traver, and C. Han, "A study on hybrid force/motion control for automated robotic building maintenance system," *International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, vol. 28, no. 1, pp. 1468-1469, 2011.
- [20] M. Kang, S. Lee, B. Chun, K. Shin, A. E. Traver, and C. Han, "Window contamination detection method for the robotic building maintenance system," *International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, vol. 28, no. 1, pp. 1432-1433, 2011.
- [21] M. H. Kutner, C. J. Nachtsheim, and J. Neter, *Applied linear regression models*, 5th ed., McGraw-Hill/Irwin, 2004.
- [22] D. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 6th ed., John Wiley and Sons, 2005.
- [23] H. Rowlands and D. T. Pham, "Application of the Taguchi method to the design of a robot sensor," *Robotica*, vol. 13, no. 1, pp. 607-617, 1997.
- [24] K. Hafeez, H. Rowlands, G. Kanji, and S. Iqbal, "Design optimization using ANOVA," *Journal of Applied Statistics*, vol. 29, no. 6, pp. 895-906, 2002.
- [25] L. Fortuna, S. Graziani, A. Rizzo, and M. G. Xibilia, *Soft sensors for monitoring and control of industrial processes*, *Advances in industrial control*, Springer-Verlag, London, 2007.



**이 승 훈**

2007년 한양대학교 기계공학과 졸업.  
2009년 한양대학교 대학원 기계공학과 석사졸업. 2009년~현재 한양대학교 대학원 기계공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 건설자동화, 인간로봇협업 시스템, 필드로봇, 다중로봇 운동계획.



**김 동 형**

2008년 한양대학교 기계공학과 졸업.  
2010년 한양대학교 대학원 기계공학과 석사 졸업. 2010년~현재 한양대학교 대학원 기계공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 모바일 로봇 및 차량의 센서 기반 운동/경로계획.



**강 민 성**

2000년 홍익대학교 기계공학과 졸업.  
2002년 홍익대학교 대학원 기계공학과 석사 졸업. 2008년~현재 한양대학교 대학원 메카트로닉스공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 건설자동화, 인간로봇협업, 무인 굴삭시스템, 재활로봇.



**길 명 수**

2005년 공주대학교 기계공학과 졸업.  
2008년 한양대학교 대학원 메카트로닉스공학과 석사 졸업. 2009년~현재 한양대학교 대학원 메카트로닉스공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 건설자동화, 인간로봇협업, 유리마감재설치로봇.



**김 영 수**

1997년 숭실대학교 기계공학과 졸업.  
2005년 고려대학교 대학원 기계공학과 석사 졸업. 2007년~현재 한양대학교 대학원 메카트로닉스공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 다축차량 구동 및 제어, 센서기반 운동계획.



**백 성 훈**

1996년 건국대학교 항공우주공학과 졸업.  
1998년 건국대학교 대학원 기계공학과 석사 졸업. 2011년~현재 한양대학교 대학원 메카트로닉스공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 무인차량 주행제어, 다중센서 기반 자율주행.



**한 창 수**

1983년 한양대학교 기계공학과(공학사).  
1985년 Texas at Austin Mechanical Engineering(공학석사). 1989년 Texas at Austin Mechanical Engineering(공학박사).  
1990년~현재 한양대학교 ERICA 캠퍼스 기계공학과 교수. 관심분야는 로봇 메커니즘 설계 및 해석, 차량동역학, 필드로봇, 서비스 로봇, 건설자동화, Wearable robot.